

Quintom.

Jonathan Rincón Saucedo

4 de abril de 2018

Resumen

Este trabajo tiene la finalidad de presentar un candidato potencial para la energía oscura denominado Quintom. Haremos un breve repaso en la historia sobre como se tuvo que plantear la idea de una energía que aceleraba el Universo, así como los modelos más simples en la cosmología que tratan de solucionar el problema de la expansión. Nos concentraremos en los modelos Quintessence y Phantom los cuales nos daran las bases para la comprensión de nuestro modelo Quintom, el cual resulta la mejor opción de tratar de resolver el problema.

Por ahora me estoy concentrando en la introducción, energía oscura y las motivaciones de los campos escalares así como los problemas que conlleva el modelo Λ CDM (el problema de la coincidencia, el problema del ajuste fino, etc)

Introducción

La cosmología es la ciencia encargada de entender el Universo como un todo. Desde como fué su comienzo, su evolución y si tendrá un final. Este conocimiento que ha tenido que ser poco a poco descubierto por medio de observaciones y modelos propuestos por científicos aún tiene muchas interrogantes, una de ellas es su composición.

Gracias a las observaciones del deuterio primordial que se origino en la nucleosíntesis del Big Bang junto con las observaciones de la radiación cósmica de fondo de microondas, se conoce que cerca del 4 % de la composición total del Universo es materia bariónica, es decir, la materia que nos rodea con la cual estan hechos las estrellas, los planetas y en escencia nosotros.

Pero ¿Qué pasa con el otro 96 %? En 1933, el astrofísico Fritz Zwicky realizó observaciones sobre cuerpos astronómicos orbitando en la galaxia para así poder calcular su velocidad radial, dichas observaciones las hizo en 8 galaxias del cúmulo de Coma y notó que sus velocidades radiales eran muy grandes para la cantidad de materia visible. El valor observado discrepaba unas 400 veces más que el valor teórico que se esperaba. Por lo cual Zwicky propuso la idea de que debería haber alguna especie de materia invisible lo que luego se denomino materia oscura. Un tipo de materia no bariónica y que interactúa muy débilmente

con la materia convecional. Según las observaciones la materia oscura representa alrededor del 26 % de la composición del Universo.

El otro 70 % faltante se le atribuye a una extraña energía que impulsa al Universo a tener una expansión acelerada denominada energía oscura. El primer indicio fue en 1917, cuando Einstein agregó un término a sus ecuaciones que denominó constante cosmológica, con el propósito de mantener un Universo estático. Lo que resultaría algo negativo cuando en 1922 Alexander Friedmann dedujo varias soluciones a las ecuaciones de Einstein proponiendo universos que se contraían o expandían dependiendo de los valores que tomara la constante cosmológica.

Aunque Friedmann fue el primero en sugerir un Universo en expansión no fue sino hasta 1927 cuando Georges Lemaitre publicó su primera teoría cosmológica en la cual se tomaba un Universo con simetría esférica, eterno y en evolución con lo cual se sentaron las bases teoricas de la expansión del Universo. Dos años mas tarde gracias al trabajo de Edwin Hubble donde analizaba la velocidad radial, respecto a la Tierra, de algunas galaxias cuyas distancias habia calculado entre 1924 y 1925. Mostraba que la gran mayoría tenían corrimientos hacia el rojo que solo podía explicarse bajo la suposición que se alejaban unas de otras. Esta fue la primera prueba observacional concreta de que el Universo se estaba expandiendo.

Luego en 1998 de las observaciones de supernovas de tipo 1a, realizadas por Supernova Cosmology Project y el High-z Supernova Search Team, sugirieron que además de estar en expansión, el Universo se estaba acelerando. Por lo que debería haber alguna especie de energía que impulse al Universo a estar en dicho estado. A esta energía se le conoce como energía oscura.

Ecuaciones de Einstein

FRW

Para poder modelar nuestro Universo hay que tener muchas consideraciones en cuenta, el modelo FRW (Friedmann-Robertson-Walker) considera un Universo homogéneo e isótropo. Donde por homogeneidad nos referimos a que todos los puntos son equivalentes, e isotropía se refiere a que todas las direcciones son equivalentes en una hipersuperficie particular.

Donde la métrica es

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right] \quad (1)$$

Si introducimos la métrica anterior en las ecuaciones de Einstein obtenemos las ecuaciones de Friedmann:

$$3M_P^2 H^2 = \rho \quad (2)$$

$$-2M_P^2 \dot{H} = \rho + p \quad (3)$$

Donde $\dot{H} = \frac{\dot{a}}{a}$ y $M_P^2 = \frac{1}{8\pi G}$, si combinamos las ecuaciones anteriores obtenemos

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\rho + 3p}{6M_P^2} \quad (4)$$

cuando $p > -\frac{\rho}{3}$ el Universo desacelera mientras que para $p < -\frac{\rho}{3}$ acelera. Además definimos la densidad de materia, radiación y energía oscura como:

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}; \Omega_r = \frac{\rho_r}{\rho_c}; \Omega_{de} = \frac{\rho_{de}}{\rho_c} \quad (5)$$

Donde $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ es la densidad crítica y $H_0 = (\frac{\dot{a}}{a})_0$ que es la expansión del Universo en el presente. (deducir las ecuaciones de Friedmann con campos escalares en desarrollo)

Λ CDM

Ya que sabemos que el Universo esta en un proceso de expansión acelerada y que la mayor parte de su composición es materia oscura fría (CDM) en forma de polvo combinada con un fluido con presión negativa y semejante en magnitud a su densidad de energía, es decir, energía oscura (DE). Uno de los modelos más aceptados es el Λ CDM donde el término Λ (constante cosmológica) representa la energía oscura.

Se considera un Universo FRW donde solo se considera el caso plano ($K = 0$) por lo que la métrica del espacio-tiempo es:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\delta_{ik}dx^i dx^k \quad (6)$$

donde los índices latinos como $i, k = 1, 2, 3$ representan los índices espaciales y δ_{ik} es la delta de Kronecker. Para este modelo la ecuación de Friedmann para la componente 0,0 de las ecuaciones de Einstein resulta:

$$H^2 = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3}\rho_{CDM} + \frac{\Lambda}{3} \quad (7)$$

donde el \dot{a} representa la derivada respecto al tiempo cosmológico, ρ_{CDM} es la densidad de energía de la materia oscura fría y la constante cosmológica podemos relacionarla con la densidad de energía del vacío como: $\rho_{vac} = \frac{\Lambda}{8\pi G}$

La componente i, k de las ecuaciones de Einstein se denomina ecuación de Raychaudhuri

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3}\rho_{CDM} + \frac{\Lambda}{3} \quad (8)$$

Esta ecuación nos dice el término de la constante cosmológica origina una fuerza repulsiva que puede contrarrestar la fuerza de gravedad generada por la CDM.

La generalización de la ley de conservación o de continuidad de los momentos y la energía es forma covariante es:

$$\nabla^a T_{ab} = 0 \quad (9)$$

De esta manera la ecuación de continuidad para el modelo Λ CDM es:

$$\rho_{CDM} \dot{a} + H(\rho_{CDM} + P_{CDM}) = 0 \quad (10)$$

Ahora ya que tenemos solo 2 ecuaciones independientes y 3 incognitas (a, ρ_{CDM} y P_{CDM}) es necesario proponer una ecuación de estado.

(falta ecuación de estado, factor de escala, problemas del modelo)

Quintessence

En la literatura Quintessence es una componente negativa de la presión del fluido cósmico con las características siguientes: varía en el tiempo y es espacialmente inhomogéneo. Esta es su principal diferencia con el modelo de Λ que es espacialmente dinámica. En general el campo de quintessence es un campo escalar con un término de energía cinética mínimamente acoplado a la gravedad. La acción de la parte escalar está dada por:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right] \quad (11)$$

Donde hemos puesto como convención la métrica $(-, +, +, +)$ de modo que el campo escalar tenga un término cinético estándar. Si tomamos la variación de $g^{\mu\nu}$ podemos obtener la ecuación para el tensor de energía momento dada por:

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - g_{\mu\nu} \left[\frac{1}{2} \partial^\lambda \phi \partial_\lambda \phi + V(\phi) \right] \quad (12)$$

En donde la densidad de energía y presión son:

$$\rho_{de} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (13)$$

$$p_{de} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi) \quad (14)$$

Y las ecuaciones de Friedmann son:

$$3M_P^2 H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (15)$$

$$-2M_P^2 \dot{H} = \rho_{de} + p_{de} \quad (16)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) obtenemos

$$3M_P^2 H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (17)$$

$$-2M_P^2 \dot{H} = \dot{\phi}^2 \quad (18)$$

La ecuación de estado tiene la forma

$$w_{de} = \frac{p_{de}}{\rho_{de}} = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)} \quad (19)$$

completar quintessence (en desarrollo)

Phantom

Al igual que Quintessence el modelo Phantom es un modelo para la energía oscura. Su peculiaridad es que posee un termino de energía cinética negativa. Como en el caso anterior la acción esta determinada por

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right] \quad (20)$$

Pero en este caso la parte cinética del lagrangiano es la forma $\mathcal{L}_{kinetic} \propto -\dot{\psi}^2$. Para phantom la densidad de energía y presión son

$$\rho_{de} = -\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (21)$$

$$p_{de} = -\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi) \quad (22)$$

En donde obtenemos la ecuacion de estado

$$w_{de} = \frac{p_{de}}{\rho_{de}} = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)} \quad (23)$$

En donde obtenemos que hay dos posibles resultados para la ecuación de estado: la primera es que $w_{de} > 1$ en donde la parte cinética domina y el segundo caso cuando $w_{de} < -1$ en donde la parte del potencial domina.

Este último caso tiene un comportamiento muy peculiar ya que actúa como una componente de la energía oscura con super aceleración. Es decir el Universo tendría una aceleración mucho más rápida que una exponencial. Cuando ocurre esto la densidad de energía crece hasta que alcanza el infinito de manera que la tasa de expansión diverge y se produce un fenómeno denominado "Big Rip".

1. Quintom

Sabemos que el campo Quintessence siempre tiene $w_{de} > -1$ y el campo Phantom $w_{de} < -1$. Si hacemos una combinación de estos dos modelos anteriores para obtener una $w_{de} = w(z)$, obtenemos lo que se denomina energía oscura Quintom.

Un detalle importante es que no es posible sólo con un campo escalar cruzar la línea divisora phantom, por lo que nos vemos obligados a considerar modelos con al menos dos campos escalares, con la acción

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - V(\phi, \sigma) \right] \quad (24)$$

Donde la ecuación de estado vendría dada por

$$w_{de} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 - V(\phi, \sigma)}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 + V(\phi, \sigma)} \quad (25)$$